

УДК 621.314.5

Сокол Евгений Иванович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой промышленной и биомедицинской электроники, тел. +380-706-3213, E-mail sokol@kpi.kharkov.ua

Бутова Ольга Анатольевна, ст. преподаватель, +380-707-6044, E-mail olga.butova@ukr.net

Шишкин Михаил Анатольевич, канд. техн. наук, доц., тел. +3807076044, E-mail: m_shishkin@inbox.ru
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

МATLAB-МОДЕЛЬ 12-ТИ ПУЛЬСНОГО ПАРАЛЛЕЛЬНОГО КУВ С РАЗДЕЛЕННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Разработана MATLAB-модель реального КУВ с учетом процесса коммутации. Даны рекомендации по выбору закона управления с учетом различных критериев. Представлена реализация системы управления, осуществляющая оптимизацию по равенству токов мостов. Исследованы основные энергетические характеристики в различных режимах работы системы.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, энергетические характеристики, компенсированный управляемый выпрямитель (КУВ).

Сокол Євген Іванович, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри промислової та біомедичної електроніки, тел. +380-706-3213, E-mail sokol@kpi.kharkov.ua

Бутова Ольга Анатоліївна, ст. викладач, +380-707-6044, E-mail olga.butova@ukr.net

Шишкін Михайло Анатолійович, канд. техн. наук, доц., тел. +3807076044, E-mail: m_shishkin@inbox.ru
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002

МATLAB-МОДЕЛЬ 12-ТИ ПУЛЬСНОГО ПАРАЛЛЕЛЬНОГО КУВ З РОЗДІЛЬНИМ УПРАВЛІННЯМ

Розроблено MATLAB-модель реального КУВ з урахуванням процесу комутації. Дано рекомендації по вибору закону управління з урахуванням різних критеріїв. Представлена реалізація системи управління, що здійснює оптимізацію по рівності струмів мостів. Досліджено основні енергетичні характеристики в різних режимах роботи системи.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, енергетичні характеристики, компенсований керований випрямляч (ККВ).

Sokol Yegen Ivanovich, Dr. Eng. Sc., Prof., Head of the Department of Industrial and Biomedical Electronics, tel. 706-32-13. E-mail: sokol@kpi.kharkov.ua

Butova Olga Anatolievna, senior lecturer, +380-707-6044, E-mail olga.butova@ukr.net

Shishkin Michael Anatolievich, PhD Tech. Sc., Assoc. Prof, tel. +3807076044, E-mail: m_shishkin@inbox.ru
Kharkiv National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine. Str. Frunze, 21, Kharkiv, Ukraine, 61002

МATLAB-MODEL 12-PULSE PARALLEL COMPENSATED CONTROLLED RECTIFIER WITH SEPARATE CONTROL

Developed MATLAB-model of the real CCR considering commutation process. Recommendations on the choice of the control law according to various criteria. Shows an implementation of the control system are optimized for Equality current bridges. The basic energy characteristics in various operating modes of the system.

Key words: electromagnetic compatibility, power characteristics, compensated controlled rectifier (CCR).

Введение

Одной из основных проблем при использовании преобразователей AC-DC (выпрямителей) в современной промышленности и энергетике является их электромагнитная совместимость (ЭМС) с сетью.

В последние годы наметилась тенденция комплексного подхода к созданию более совершенных топологий мощных выпрямителей и их систем управления для улучшения ЭМС преобразователей с питающей сетью. Это позволяет одновременно решить несколько задач:

- улучшить энергетические показатели системы (коэффициента мощности, к.п.д.);
- уменьшить содержание высших гармоник входного тока преобразователя;

- улучшить массогабаритные показатели преобразователей.

Перспективным является использование преобразователей на основе компенсированных управляемых выпрямителей (КУВ), несмотря на усложнение силового оборудования и сложность построения систем управления. КУВ относятся к классу выпрямителей, реализованных путем последовательного или параллельного соединения мостовых схем с естественной и искусственной коммутациями силовых ключей. При построении КУВ целесообразно использование не трехобмоточных, а двухобмоточных трансформаторов, при этом улучшаются массо-габаритные показатели, динамические и энергетические характеристики преобразовательной системы. При такой реализации КУВ возможна модификация уже существующих 6-пульсных преобразователей путем включения дополнительного полностью управляемого выпрямителя.

Использование параллельного соединения двух мостовых схем в схемах КУВ на однооперационных тиристорах и полностью управляемых ГТО-тиристорах (рис. 1), позволяет одновременно повысить коэффициент мощности (K_M) и улучшить гармонический состав сетевого тока [1].

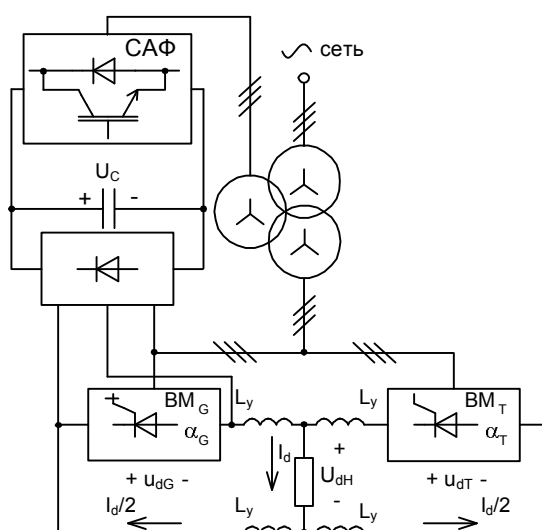


Рис.1. Схема 12-ти пульсного параллельного КУВ

Сравнение способов управления управляемыми выпрямителями (УВ) и КУВ, выполненное в [2], показало влияние закона управления УВ на энергетические показатели. Проведенный в [3, 4] анализ особенностей работы схемы 12-ти пульсного параллельного КУВ с одной вентильной обмоткой преобразовательного трансформатора показал необходимость определения требуемого алгоритма управления исходя из многокритериальной оптимизации вектора цели. В качестве критериев может рассматриваться максимальный коэффициент мощности, минимальный разбаланс токов мостов, максимальный к.п.д. системы.

Выбор закона управления

Требования к системе управления определяются требованиями к системе в целом.

В режиме симметричного управления двумя мостами, т.е. закона управления при равенстве углов управления $|\alpha_G| = \alpha_T$, где α_G и α_T – углы управления полностью управляемым и традиционным управляемым выпрямителями соответственно. При мгновенной коммутации обеспечивается поддержание единичного коэффициента сдвига основной гармоники сетевого тока относительно напряжения сети и подавление высших гармоник сетевого тока [1].

При учете коммутации силовых ключей проявляется несовпадение внешних и регулировочных характеристик выпрямителей, что приводит к появлению разбаланса токов

выпрямителей в режиме симметричного управления. Одной из задач системы управления является симметрирование токов в мостовых схемах КУВ.

Распределение тока между двумя параллельно работающими выпрямителями определяется, исходя из равенства напряжений выпрямителей при заданной нагрузке. Среднее значение выпрямленного напряжения U_d каждого из выпрямительных мостов уменьшается вследствие появившихся коммутационных площадок в кривой напряжения – коммутационного падения напряжения ΔU_γ

$$U_d = U_{d0} - \Delta U_\gamma.$$

Приняв в качестве базового тока номинальный ток нагрузки, а в качестве базового напряжения – номинальное выпрямленное напряжение, с учетом равенства мгновенных выпрямленных напряжения мостов можно записать [6]:

$$U_{d0G}^* - \Delta U_{\gamma G}^* I_{d1}^* - \Delta U_{aG}^* = U_{d0T}^* - \Delta U_{\gamma T}^* I_{d2}^* - \Delta U_{aT}^*,$$

U_{d0G}^*, U_{d0T}^* – относительные значения напряжения холостого хода, приведенные к общему номинальному напряжению;

I_{d1}^*, I_{d2}^* – относительные значения выпрямленного тока выпрямителей, приведенные к номинальному току;

$\Delta U_{aG}^*, \Delta U_{aT}^*$ – относительные значения падения напряжения, приведенные к номинальному напряжению;

$\Delta U_{\gamma T}^*, \Delta U_{\gamma G}^*$ – относительные значения напряжения выпрямителей вследствие коммутации при базовом токе, приведенные к общему номинальному напряжению.

С учетом $I_{d1}^* + I_{d2}^* = I_d^*$:

$$I_{d1}^* = \frac{I_d^* \Delta U_{\gamma G}^* + (U_{d0G}^* - U_{d0T}^*) - (\Delta U_{aG}^* - \Delta U_{aT}^*)}{\Delta U_{\gamma T}^* + \Delta U_{\gamma G}^*},$$

$$I_{d2}^* = \frac{I_d^* \Delta U_{\gamma T}^* + (U_{d0G}^* - U_{d0T}^*) - (\Delta U_{aG}^* - \Delta U_{aT}^*)}{\Delta U_{\gamma T}^* + \Delta U_{\gamma G}^*}.$$

Поскольку выпрямители работают от одного трансформатора, то при расчете выпрямленных напряжений мостов будут равны реактивные сопротивления, падения напряжений на активных сопротивлениях $\Delta U_{aG}^* = \Delta U_{aT}^*$ и напряжения холостого хода $U_{d0G}^* = U_{d0T}^*$. Но поскольку вольт-секундные площадки, определяющие величину индуктивного падения выпрямленного напряжения разные, то равенство токов будет зависеть только от коммутационных процессов в каждом из выпрямителей:

$$I_{d1}^* = \frac{I_d^* \Delta U_{\gamma G}^*}{\Delta U_{\gamma T}^* + \Delta U_{\gamma G}^*};$$

$$I_{d2}^* = \frac{I_d^* \Delta U_{\gamma T}^*}{\Delta U_{\gamma T}^* + \Delta U_{\gamma G}^*}.$$

Для правильного распределения тока между параллельно работающими выпрямителями во время переходного процесса, т.е. равенства токов $I_{d1}^* = I_{d2}^* = I_d^*/2$, коммутационные падения напряжения должны быть равны $\Delta U_{\gamma T}^* = \Delta U_{\gamma G}^*$, что невозможно обеспечить при симметричном законе управления.

В общем виде, многоконтурная система подчиненного регулирования 12-ти пульсного параллельного КУВ с одной вентиляющей обмоткой преобразовательного трансформатора представлена на рис. 2.

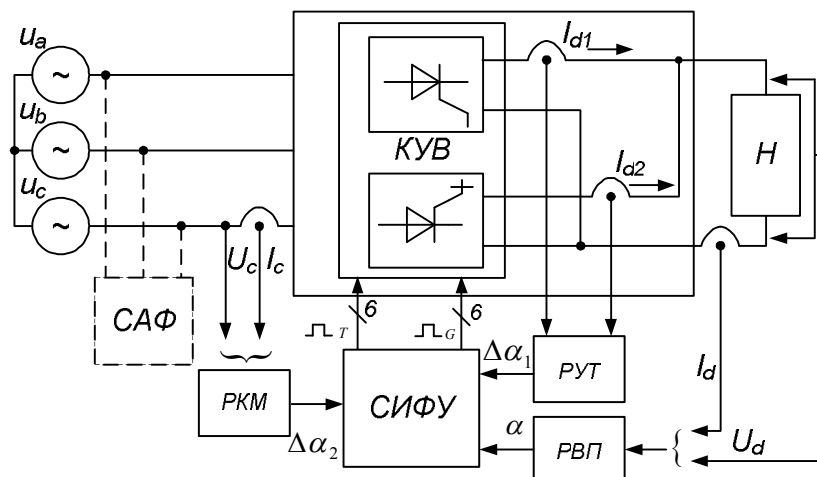


Рис. 2. Многоконтурная система подчиненного регулирования 12-ти пульсного параллельного КУВ

Схема управления включает в себя автоматические регуляторы: выходных параметров (РВП), уравнивающих токов (РУТ), коэффициента мощности (РКМ). В зависимости от требований нагрузки (Н) преобразователя, формирование углов управления в системе импульсно-фазового управления (СИФУ) может осуществляться с учетом разных приоритетов. Сигнал рассогласования токов выпрямительных мостов (РУТ) $\Delta\alpha_1$ учитывается одновременно с управляющим сигналом α . При регулировании тока нагрузки в СИФУ формируются две импульсные последовательности на вентильные мосты. В результате имитационного моделирования в [4] показано, что при равенстве средних токов I_{d1} и I_{d2} мостовых схем КУВ углы управления выпрямительными мостами различны, т. е. $|\alpha_G| \neq \alpha_T$, что приводит к фазному сдвигу между входными токами и напряжениями.

С целью обеспечения равенства токов мостов I_{d1} и I_{d2} предлагается использовать систему раздельного управления токами выпрямителей. Функциональная схема представлена на рис. 3.

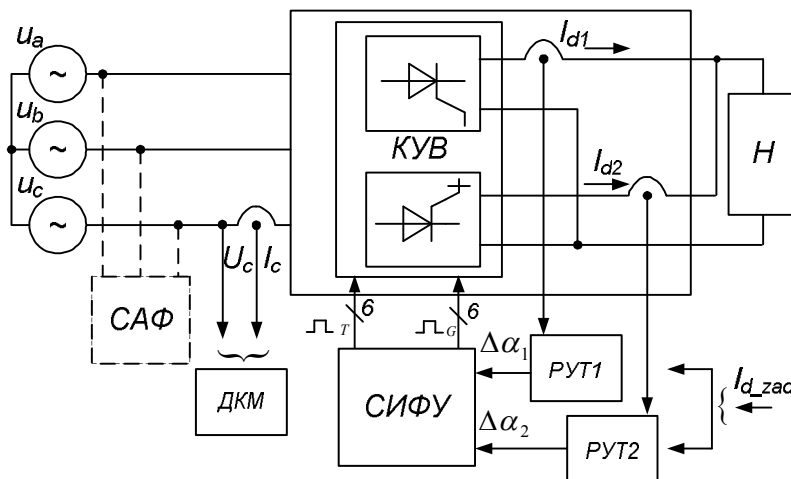


Рис. 3. Функциональная схема систему раздельного управления токами выпрямителей

При раздельном управлении суммарный ток нагрузки формируется в результате стабилизации тока каждого моста в регуляторах уравнивающих токов (РУТ1, РУТ2) на уровне половины номинального тока. При этом угол управления вентильного моста на однооперационных и GTO-тиристорах формируется независимо как пропорционально-интегральная функция ошибки между $I_d/2$ и текущим значением тока соответствующего моста.

Для определения влияния составляющих КУВ на его характеристики в данной схеме исключен контур регулирования коэффициента мощности (РКМ), блок ДКМ фиксирует основные показатели преобразовательной системы.

Результаты моделирования

Проверка теоретических положений была осуществлена с помощью моделирования процессов с использованием пакета Matlab/Simulink. Исследования проводились на примерах 6-ти и 12-ти пульсных преобразователях, работающих от стандартного трансформатора одной и той же мощности ТМП-2500/10У2 номинальной мощностью 2MW на активно-индуктивную нагрузку. Matlab-модель схемы КУВ, представлена на рис. 4.

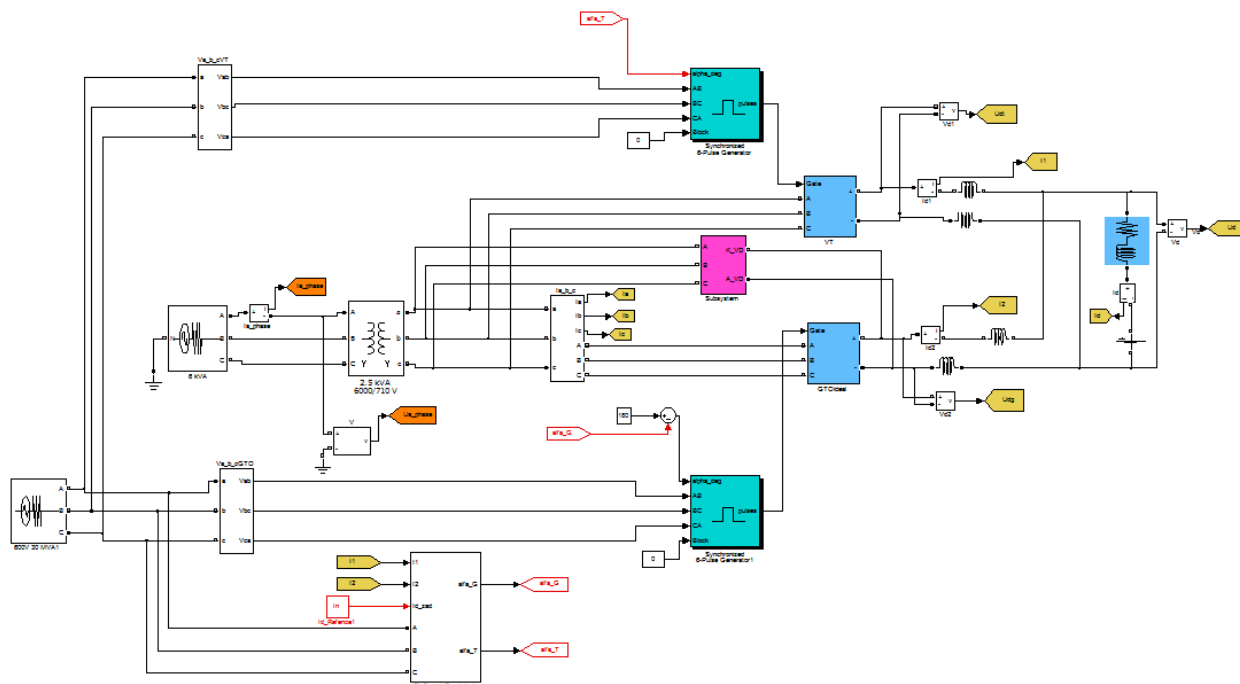


Рис. 4. Matlab-модель схемы КУВ

Результаты моделирования показали, что реализация системы управления (рис. 3) позволяет обеспечить равенство токов выпрямителей. При этом углы управления α_G и α_T существенно различны (рис. 5) во всем диапазоне регулирования тока от 0,7 до 1,0 I_{dn} ($I_{dn} = 2500 A$).

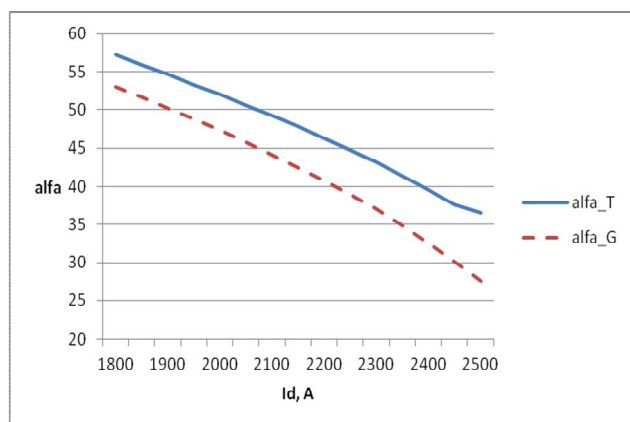


Рис. 5. Зависимость $\alpha = f(I_d)$

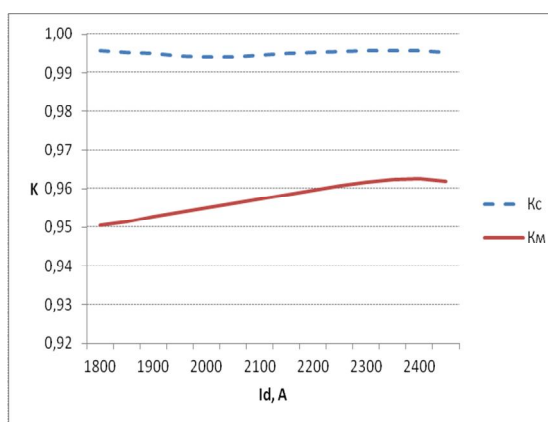


Рис. 6. Зависимость $K = f(I_d)$

Основные энергетические показатели связаны с неактивными составляющими полной мощности. Основными контролируемыми показателями, которые определяют коэффициент мощности K_M являются коэффициент сдвига K_C и коэффициент искажения K_H . Как

следует из графиков, коэффициент сдвига K_C исследуемой схемы КУВ имеет значение близкое к единице во всем диапазоне регулирования тока нагрузки (рис. 6), в то время коэффициент сдвига K_C отдельных мостовых схем пропорционален косинусу угла управления [5].

Высокий коэффициент мощности K_M (более 0,95) при близком к единице коэффициенте сдвига K_C показывает, что данная схема имеет незначительный коэффициент искажений входного тока.

Выводы

1. Учет реальных параметров коммутации силовых ключей показал различие характеристик выпрямителей в составе КУВ, что приводит к появлению разбаланса токов выпрямителей в режиме симметричного управления.

2. Предложена система раздельного управления токами выпрямителей, которая обеспечивает равенство токов мостов I_{d1} и I_{d2} .

3. В предложенной системе углы управления α_G и α_T существенно различны во всем диапазоне регулирования тока управления КУВ.

4. Энергетические показатели исследуемой системы КУВ коэффициент сдвига K_C и коэффициент мощности K_M имеют близкое к единице значение во всем диапазоне регулирования тока нагрузки.

Список используемой литературы

1. О. А. Бутова, В. В. Замаруев, В. А. Макаров, М. А. Шишкин. Улучшение энергетических показателей систем постоянного тока с 6-пульсными управляемыми выпрямителями. Технічна електродинаміка. – Київ, 2011. – Тематичний випуск “Силовая електроніка та енергоефективність”. – Ч.2. – С. 83-87.
2. Бутова О. А. Анализ принципов построения систем управления многопульсными выпрямителями. Технічна електродинаміка. – Київ, 2009. – Тем. випуск “Силовая електроніка та енергоефективність”. – Ч. 5, С. 59–65.
3. Бутова О. А., Жемеров Г. Г., Замаруев В. В. Исследование процессов двенадцатипульсного параллельного компенсированного управляемого выпрямителя //Технічна електродинаміка. – Київ, 2008. – Тем. Випуск “Силовая електроніка та енергоефективність”. – ч. 2. – С. 3–10.
4. Butova Olga. Features the Control of 12-Pulse Compensated Controlled Rectifier. 13th International Symposium “Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering” and “Doctoral School of Energy and Geotechnology II”, PÄRNU 2013, P. 219–222.
5. Забродин Ю. С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1982. – 496 с.
6. Ривкин Г. А. Преобразовательные устройства. – М.: Энергия, 1970. – 544 с.

References

1. O. A. Butova, V. V. Zamaruev, V. A. Makarov, M. A. Shishkin. Improving the energy performance of DC systems with 6-pulse controlled rectifiers. Tehnichna elektrodinamika. – Kyiv, 2011. – Theme Issue "Power electronics and energy efficiency". – Part 2, – P. 83–87.
2. Butova O. A. Analysis of the principles of building management systems mnogopulsnymi rectifiers. Tehnichna elektrodinamika. – Kyiv, 2009. Theme Issue "Power electronics and energy efficiency". – Part 5, –p. 59–65.
3. Butova O.A., Zhemerov G.G., Zamaruev V.V. Research of processes in parallel compensated twelve-pulse controlled rectifier.- Tehnichna elektrodinamika. - Kyiv, 2008. - Theme Issue "Power electronics and energy efficiency". – Part 2, -3-10 pp.
4. Butova Olga. Features the Control of 12-Pulse Compensated Controlled Rectifier. 13th International Symposium “Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering” and “Doctoral School of Energy and Geotechnology II”, PÄRNU 2013, – P. 219–222.
5. Zabrodin U. S. Industrial electronics: Textbook for universities. - M.: Higher. School, 1982. – 496 p.
6. Rivkin G.A. Converting devices. – Moscow: Energiya, 1970. – 544 p.

Поступила в редакцию 20.07 2014 г.